



基于混合储能的机械型变压器直流微网功率和能量管理

王威

(濮阳职业技术学院, 河南 濮阳 457000)

摘要: 为更好应对直流微网中的功率波动, 满足电信号资源的能量平衡需求, 针对基于混合储能的机械型变压器直流微网功率和能量管理策略展开研究。分析机械型变压器在直流微网中的应用, 进而实现对混合储能系统的功能互补, 完成对微电网系统架构与功能的定位。在此基础上, 提出分层控制架构, 并联合关键控制算法, 完善功率与能量管理策略。以机械型变压器的动态响应限制作为切入点, 对混合储能寿命进行管理, 从而分析混合储能技术所面临的挑战与具体解决方案。

关键词: 混合储能; 机械型变压器; 直流微网功率; 能量管理; 功能互补; 分层控制

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0195

中图分类号: TM 732

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 04-1325-03

Mechanical transformer DC microgrid power and energy management based on hybrid energy storage

WANG Wei

(Puyang Vocational and Technical College, Puyang 457000, Henan, China)

Abstract: To better cope with power fluctuations in DC microgrids and meet the energy balance requirements of electrical signal resources, research is conducted on power and energy management strategies for mechanical transformers based on hybrid energy storage in DC microgrids. Analyze the application of mechanical transformers in DC microgrids, and achieve complementary functions for hybrid energy storage systems, completing the positioning of microgrid system architecture and functions. On this basis, a hierarchical control architecture is proposed, and key control algorithms are combined to improve power and energy management strategies. Using the dynamic response limitation of mechanical transformers as a starting point, manage the lifespan of hybrid energy storage, and analyze the challenges and specific solutions faced by hybrid energy storage technology.

Keywords: hybrid energy storage; mechanical transformer; DC microgrid power; energy management; functional complementarity; layered control

在“双碳”战略的驱动下, 全球能源转型成为了必然趋势。其中, 直流微网以其低转换损耗、高效能传输、高负荷兼容的优势, 在分布式能源系

统、智能电网等多个领域中呈现出极为强劲的发展势头。然而, 随着可再生能源的接入, 如何在保障直流微网灵活性能的同时, 大幅提升电信号资源派

收稿日期: 2026-03-10; 修改稿日期: 2026-04-07。

基金项目: 河南省高等教育教学改革研究与实践项目 (2024SJGLX0681)。

作者简介: 王威 (1986—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为机电一体化, E-mail: junhu_01@126.com。

引用本文: 王威. 基于混合储能的机械型变压器直流微网功率和能量管理[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1325-1327.

Citation: WANG Wei. Mechanical transformer DC microgrid power and energy management based on hybrid energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1325-1327.

透率，成为了一项亟待解决的问题。

混合储能技术基于多时间尺度原则所提出的功率解耦机制为电力系统的动态调控提供了全新的发展思路。特别是在超级电容等充放电元件的促进下，高频电力波动得到了有效抑制，不但弥补了电力系统的低频功率缺额，也实现了对长期电压稳定状态的支撑。因此，利用混合储能技术实现直流微网功率与能量的管理具有广阔的发展前景。

1 系统架构与功能定位

1.1 机械型变压器在直流微网中的应用

机械型变压器在直流微网中的应用主要通过电力电子变换器实现对系统变电功能的拓展，可以综合多能协调、故障隔离、电压变换、信号分类等不同的作用机制提升电力系统的运行可靠性。相较于其他类型的变压元件，机械型变压器可以直接将直流输入电转换为变频交流输出电。

由于变电过程中，电力信号不需要反复经历变压器的转存与变换处理，所以在信号传输量相同的情况下，该类型变压器转化所得的信号输出量更大。通常情况下，只要目标对象保持分布式接入状态，机械型变压器就可以同时响应一种或几种能源传输信号。电力传输过程中，变压器可以根据信号电磁隔离特性抑制故障范围内电流的传播。因此，在某一直流微网区域发生短路或断路故障时，变压器能够阻止故障电流向外扩散，从而保障核心输电设备的运行安全。

如果储能过程中，直流微网与交流电网保持互联关系，那么机械型变压器将直接作为逆变器元件输出端的隔离升压装置，从而在转换直流电信号的同时，将交变电流接入下级电网组织之中。然而在此场景下，逆变器必须与变压器配合使用，才能够完成对电流信号的转换处理。因此，机械型变压器的电压变换供能被严重限制，只能表现出对输入信号的间断性敏感状态。

1.2 混合储能系统的功能互补

作用于直流微网的混合储能系统可以协同多种不同的储能技术，调节电力资源传输功率，在多时间尺度上，抑制信号波动行为，在解决可再生能源间歇性问题的同时，优化电力网络中的资源配置。

从功能性角度来看，混合储能系统的功能互补机制主要作用于多时间尺度功率分解与协同控制、

功率与能量解耦控制、寿命与成本优化三方面^[1]。

(1) 多时间尺度功率分解与协同控制。多时间尺度功率分解与协同控制特指超级电容器通过毫秒级响应，抑制系统瞬时功率波动，既优化了储能设备的充放电策略，也大幅减少了设备过载现象。

(2) 功率与能量解耦控制。功率与能量解耦控制旨在从功率型任务、能量型任务两方面着手，不但减少了储能设备的容量冗余，也避免了电池设备出现高频充放电行为。

(3) 寿命与成本优化。寿命与成本优化主要通过信号高频波动行为的隔离，提升电池元件的使用寿命，从而避免直流微网因频繁充放电而出现老化或负载波动的问题。

2 功率与能量管理策略

2.1 分层控制架构

直流微网分层控制架构将混合储能系统划分为不同层级结构，并在每一层级单元中嵌入相应控制策略，进而实现对微电网的优化控制，典型的架构模型为三层控制。

(1) 调度管理层(顶层控制)：根据上级电力终端输出的调度指令以及微电网的实时运行状态，定义并离网切换方案、功率分配策略与发电计划，实现了对微电网与上级电网的同步管理。

(2) 母线电压控制层(中层控制)：负责维持电网母线端负荷电压的稳定性，具有动态调整储能系统输出功率与调整分布式电源的能力，根据直流母线电压数值水平，完成对储能功率的快速分配。

(3) 变换器控制层(底层控制)：主要针对储能变流器、光伏逆变器等精密的电子设备进行控制，不但有助于保障电力元件的高效稳定运行，还可以实施对电流电压的精准调节。

此外，在分层控制架构中，调度管理层、母线电压控制层、变换器控制层保持相互独立的连接状态，特别是在直流微网功率较高的情况下，任何一个层级组织发生故障问题，都不会对其他架构体系造成影响，且故障模式下，机械型变压器依然能够保持稳定的运行状态。因此，基于该模式进行混合储能的能量管理能够避免能源过度损耗。

2.2 关键控制算法

(1) 基于下垂控制的功率分配算法。模拟机械型变压器的下垂特性，通过调节储能系统直流母线

端负载电压与目标变电终端输出功率之间的配比关系,动态分配电力资源。由于机械型变压器负荷功率的变化只影响直流母线端电压,所以该方法的实现不需进行额外通信,就可以保障调节结果的准确性,故更适用于分布式微电网环境^[2]。

(2) 基于模型预测控制的优化算法。通过构建直流微网的动态化模型,预测机械型变压器在未来一段时间内的发电情况与功率需求,达到优化控制策略的目的。直流微电网以机械型变压器作为核心构件,通过该算法进行能量管理,既可以减少电压波动,也实现对混合储能系统充放电策略的优化。

(3) 基于分层控制的协调算法。该算法直接将直流微网划分为多个层级单元,并对其进行多尺度协调与控制。对于机械型变压器而言,该方法通过对变压器分接头的调节,间接影响直流侧的电压水平,从而使母线端电压保持动态平衡状态。

3 技术挑战与解决方案

3.1 机械型变压器的动态响应限制

电磁转换固有延迟、机械结构惯性约束是造成机械型变压器动态响应限制问题的主要原因。由于变压器必须通过电磁感应作用才能够完成电压/电流变换,所以其动态响应时间往往受制于磁通衰减过程,而这也使得励磁电流往往在较短时间内就可以达到额定数值的数倍,但在后续储能过程中,也极容易发生衰减态势。

在直流微网中,机械式有载调压分接头完成档位切换需要几秒钟,远远超过了机械型变压器所要求的微秒级调节标准。针对上述问题,需要加强调压分接头的敏感性水平,使其在混合储能过程中能够更为有效地捕捉电力信号,在微网功率发生变化时,能够更快速地调节能量负荷行为,进而在弥补直流变电设备功能性缺陷的同时,更好满足机械型变压器所要求的微秒级电量调节标准^[3]。

3.2 混合储能的寿命管理

(1) 对于直流微网的系统层可以采取全局能量管理的方式,主要协调机械型变压器的功率分配与混合储能设备的整体寿命,从而实现对电信号等效循环成本的最小化控制;

(2) 对于设备层采取单体控制的方式,针对SOC组件进行均衡性控制,在诊断变压器故障问题的同时,判断直流微网的瞬时功率是否超过其额

定数值水平,如果前者数值远低于后者,则表示当前预设的储能设备充放电策略较为合理,如果出现了前者数值明显接近后者或大于后者的情况,则表示存在过充/过放的问题;

(3) 对于元件层则主要控制电力电子接口,通过对充放电过程中电信号损耗的调节,减少变压器发热,从而将功率变换效率控制在较为合理的数值范围内。

对于直流微网而言,其所负载的储能设备多为锂电池组,且变电回路中通常设置超级电容元件。这就表示在储能量达到峰值状态时,其输出功率必然也呈现出极限水平,但由于锂电池的额定存储能力有限,所以只有对这种非常规的电力表现进行有效抑制,才能够避免出现能量极化效应。

4 结 语

本研究所提出的基于混合储能与机械型变压器协同的功率-能量分层管理策略,以应对可再生能源接入所造成的功率波动与能量平衡问题为目标,分别在系统架构与功能定位方面进行了优化,既实现了混合储能系统的功能互补,也突出了机械型变压器在直流微网中的应用优势。这种新型的应用机制突破了传统直流微网中“单一设备过载”、“电力电子依赖症”等技术层面上的瓶颈,为构建现代化的直流微网模型提供了技术支持。

未来,混合储能可以联合数字孪生、AI负荷预测等多种不同的技术手段,以减少电力系统的被动响应损耗为目标,优化机械型变压器的分接头动作,从而构建更符合实际应用需求的储能充放电联合反馈机制。此外,对于直流微网功率与能量的管理还可以延伸至热电联产、新能源调控等多元领域中,一方面提升电力系统的综合能效水平,另一方面实现多级电力资源的耦合与扩展。

参 考 文 献

- [1] 张伟杰,顾吉鹏,张有兵,等.基于T-S模糊逻辑的混合储能孤岛直流微电网功率分配控制[J].电力自动化设备,2024,44(6):135-144. DOI:10.16081/j.epae.202312002.
- [2] 张泽华,宋桂英,张晓璐,等.考虑恒功率负载的直流微电网稳定性与鲁棒性控制策略[J].电工技术学报,2023,38(16):4391-4405.
- [3] 张玉,罗浩文,王瑜琳.基于模糊-下垂控制的光伏直流微电网混合储能功率分配及母线稳压研究[J].电测与仪表,2023,60(5):51-58. DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2023.05.007.